气候暖湿化评价指数构建及在青海省的应用

王永辉[1,2]， 冶晓娟[1,2]， 潘红忠[1,2]， 白 钰[3]， 董得福[3]， 姚华明[1,2,4]

（1. 长江大学油气地球化学与环境湖北省重点实验室，湖北 武汉 430000；2. 长江大学资源与环境学院，湖北 武汉 430000；3. 黄河上游水电有限责任开发公司，青海 西宁 810000；4. 中国长江电力股份有限公司，湖北 宜昌 443000）

摘 要：综合气象要素、干旱指标与植被指数构建了气候暖湿化评价指数，利用地表湿润指数（Hi）、自校核帕尔默干旱指数（sc_PDSI）与年度归一化植被指数（NDVI），基于数据归一化方法构建气候暖湿化等级评价指数；并应用该类指数综合评价了近60 a来青海省气候暖湿现象的时空分布等级变化，以验证该类指数在不同时间序列长度及涵盖不同因素时的适用性。评价结果表明：（1）青海省近60 a总体气候处于显著暖化与微湿润化阶段；其中显著暖湿化区域集中于东南部祁连山部分地区、黄河流域南部至东南部与澜沧江流域地区；（2）近60 a气候变化并未改变青海省的气候暖湿及水资源分布格局；（3）该类指数对于区域长时间尺度下气候暖湿化趋势评价具有良好的适用性与实用性，能客观及时地反映评价区域气候暖湿化状况。

关键词：青海省；气候暖湿化；评价指数

施雅风院士等[1]于2002年首次提出：西北地区气候正由暖干转向暖湿，但由于其气象观测资料显示的降水增加序列较短，致使该气候转型理论一经提出即引起了广泛的关注和争论[2-4]，国内众多学者对青藏高原地区气候暖湿化趋势开展了一系列研究。牛涛等[5]在2005年通过趋势突变检验，提出20世纪80年代是青藏高原气候转型的节点，自此由暖干转向相对暖湿；李林等[6]在2007年对三江源区极端气候事件进行分析，提出该地区受高原季风、厄尔尼诺事件及高原积雪等因子的年际振荡影响，暖化趋势明显；在此基础上，李林等[7-8]对青藏高原1961—2007年的气温、降水等因素进行统计分析，得出青藏高原气候正趋于暖湿化的结论；其后又在2018年提出青藏高原在2006年后暖化趋势趋于缓和，暖湿化趋势有可能继续在青藏高原持续20~40 a[9]。而刘德坤等[10]基于青海省35 a（1971—2004年）湿润指数（Hi）变化，指出青海省气候总体更偏向暖干化趋势；Liu等[11]使用帕尔默干旱指数（PDSI）对青海省干湿情况进行评价，发现只有长江源区呈现湿润化趋势。上述研究既肯定了青藏高原的气候变化，又在研究结论上具有明显差异。目前，有关西北地区气候暖湿化研究存在研究要素缺乏综合性、研究方法缺乏评价性，缺乏类似干旱评价体系的评价指数，使现有研究难以达成足够共识。

青海省地处中国西北内陆、青藏高原东北部，该地区不仅是全球气候变化的敏感区，也是极为重要的三江（长江、黄河、澜沧江）源头汇水区。青海省气候干湿转型不仅对黄河流域生态保护和高质量发展有极大影响，也是目前全球气候变化研究中极为重要的一环。鉴于此，综合多因素构建科学的气候暖湿化评价指数不仅具有重要的研究意义，还可为青海省生态安全和可持续发展提供参考。

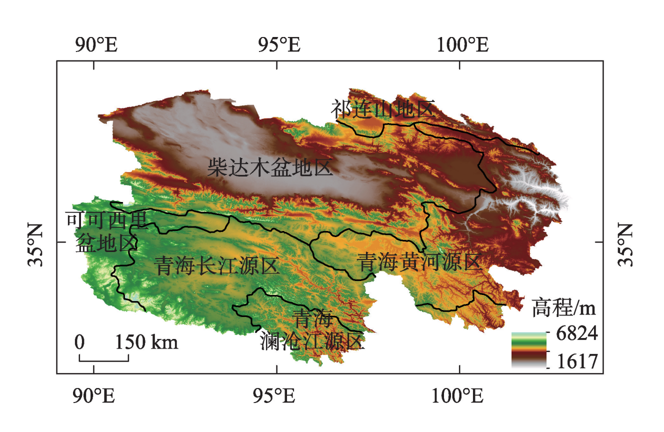
1 材料与方法

1.1 研究区概况

青海省位于89°35′~103°04′E，31°9′~39°19′N，处于高原温带半干旱地区，属高原大陆性气候，地势总体西高东低，南北高中部低。青海省西北部主要为柴达木盆地区，西部主要为可可西里盆地区，

收稿日期：2022-03-30； **修订日期：**2022-06-09
基金项目：湖北省重点实验室开放基金（ZH2102000113）；基于光伏、风电高占比条件下梯级水电站优化调度关键技术研究及应用
作者简介：王永辉（1996-），男，硕士研究生，主要从事生态水文方向研究. E-mail: WANGYonghui0808@163.com
通讯作者：潘红忠. E-mail: hzhpan@foxmail.com

南部为三江源区(东南部青海黄河源区、西南部青海长江源区及澜沧江源区),东北部则为祁连山地区(图1)。全省地形复杂,远离沿海,水汽难以到达;省域内降水少,降雨主要集中在春、夏季;全省多年平均水资源总量约为629×10^8 m^3,约占全国的2.2%,水量补给主要来源于雨水;青海省补给下游水量占黄河总径流量的49%,长江总径流量的2%,澜沧江总径流量的17%,是我国主要的水源涵养地[12]。



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2016)2556号,对底图边界无修改。下同。

图1 青海省位置示意图

Fig. 1 Map of Qinghai Province

1.2 数据来源及处理

气象数据来源于CRU TS v.4.05数据集(东英吉利大学气候研究室提供),时间分辨率为月,空间分辨率为0.5°×0.5°,时间序列长度为1901—2020年[13]。经研究检验,该数据集能较好地应用于中国区域的气候再分析[14-16]。NDVI数据主要来源于GIMMS(时间涵盖1981—2015年),时间分辨率为15 d,空间分辨率1/12°(1 km),采用最大值合成月度NDVI数据及年度数据。

基于研究方法需要,将青海省近60 a降水(PRE)、平均气温(TEM)、潜在蒸散发(PET)、自校核帕尔默干旱指数(sc_PDSI)数据提取年均值后再使用克里金法进行空间插值;将青海省33 a(1982—2015年)归一化植被指数(NDVI)数据重采样为0.01°×0.01°,进行计算分析。

1.3 方法构建

以青海省为评价对象,综合考虑气象因子、干旱指标、植被变化情况等要素,针对多年年均趋势变化,采用数据标准化方法,分别构建表征气候暖化趋势与气候综合湿润化趋势的评价指数,从2个角度对青海省近60 a气候暖湿化趋势时空变化进行等级评价。其构成因素与计算方法如下:

1.3.1 气候暖化趋势指数(CW_T) 气候暖化趋势指数需直观指示区域的暖化程度。气温(TEM)是造成气候暖化的主要因素,对区域内的蒸散发、冰川消融及河川径流过程都有较大影响。气温与气候暖化趋势呈正相关关系:气温越高,气候暖化趋势越显著,气温长时间序列变化能直观反映气候暖化程度。综合气温要素的直观性与代表性,并考虑指数计算的简便性,选取多年年均气温值归一化处理,计算年气候暖化趋势指数,计算公式为:

$$CW_T = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \tag{1}$$

式中:x_i为第i年的年均气温值;x_{max}为年均气温在时间序列长度T年中的最大值;x_{min}为年均气温在时间序列长度T年中的最小值;CW_T为第i年的暖化趋势指数,其取值范围为0~1,数值越大,表明第i年在T年时间序列长度中气候暖化趋势越明显。

1.3.2 气候综合湿润化趋势指数 气候湿润化趋势较暖化趋势更为复杂、影响因子也更多,单一因素的趋势变化无法客观全面对其评价。因此,综合适用性较好的干旱指数与植被指数表征湿润化趋势,构建更具综合性的气候湿润化趋势指数。

(1) 气候湿润化趋势指数(CH_T)

降水量(PRE)是评价湿润化趋势的关键因素,其显著增加是该地区气候湿润化的表现之一,但由于青海省年蒸发量远高于年降水量,仅靠降水量的增加不足以说明气候湿润化趋势。潜在蒸散量(PET)是西北地区干旱气候监测的关键因素[17],其计算方法采用Penman-Monteith公式[18]。综合上述2类因素,得到地表湿润指数(Humidity index,Hi)。地表湿润指数Hi=PRE/PET[10,19],作为热量与水分的综合因子能够指示地表的气候干湿情况[10,20],其值越大,气候越湿润,反之则气候越干燥。Hi综合湿润变化要素较为全面且直观,能够作为青海省气候综合湿润化趋势指数的核心要素。帕尔默干旱指数(Palmer drought severity index,PDSI)在西北地区干旱评价中适应性较好[21-22],但考虑到区域气候特征差异性的自校核帕尔默干旱指数(self-calibrating PDSI,sc_PDSI)较前者大大提高了其空间适用性[23]。该指数除考虑降水和蒸散发外,还考虑土壤水及径流等因素,对区域下垫面的干湿气候变化刻

画的更加全面。sc_PDSI作为影响要素之一,能更加全面地指示区域湿润气候的时空变化。

湿润指数Hi与自校核帕尔默干旱指数sc_PDSI指示意义不同,前者指示气候的干湿变化,后者则是表征区域的干旱程度。长期气候干燥并不代表会发生干旱灾害,而干旱灾害发生的区域也并不总伴随气候干燥。气候干旱往往是一个长期累积过程,其对于气象变化的响应需要一定滞时,区域短期的气候湿润依旧具有发生干旱灾害的风险。故气候湿润化的评价不仅要考虑短期的气候干湿变化,更要考虑长期的气候干旱风险。气候湿润化趋势指数CH_T包含Hi与sc_PDSI,其构建意义在于综合短期气候干湿变化与长期干旱风险,对气候湿润化趋势进行评价。综上所述,两指数数值及年均增幅越高,气候湿润化趋势越明显。年气候湿润化趋势指数CH_T采用下式计算:

$$CH_T=\frac{x_iy_i-\left(x_jy_j\right)_{\min}}{\left(x_ky_k\right)_{\max}-\left(x_jy_j\right)_{\min}} \tag{2}$$

式中:x_i为第i年的年均Hi值;y_i为第i年的年均sc_PDSI值;$(x_ky_k)_{\max}$为同一年年均Hi值与年均sc_PDSI值乘积在T年时间序列长度中的最大值;$(x_jy_j)_{\min}$为同一年年均Hi值与年均sc_PDSI值乘积在T年时间序列长度中的最小值;CH_T为第i年的湿润趋势指数,其取值范围为0~1,数值越大,表明第i年在T年中气候湿润化趋势越明显。

(2)气候综合湿润化趋势指数(CH_T^*)

气候暖湿后会导致植被覆盖率增加[21],归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)可以指示区域植被覆盖率,是目前研究应用广泛的植被指数之一[24-25]。基于气候湿润趋势指数CH_T,加入表征植被覆盖面积的指数NDVI,为气候湿润化趋势评价补充生态响应要素,能够更加全面反映气候湿润程度。据此构建气候综合湿润化趋势指数CH_T^*,包括湿润指数Hi、自校核帕尔默干旱指数sc_PDSI与归一化植被指数NDVI。构成CH_T^*因素的指数数值及年均增幅越高,即气候湿润化趋势越明显。年气候综合湿润化趋势指数CH_T^*采用下式计算:

$$CH_T^*=\frac{x_iy_iz_i-\left(x_jy_jz_j\right)_{\min}}{\left(x_ky_kz_k\right)_{\max}-\left(x_jy_jz_j\right)_{\min}} \tag{3}$$

式中:x_i为第i年的年均Hi值;y_i为第i年的年均sc_PDSI值;z_i为第i年的年NDVI值;$(x_ky_kz_k)_{\max}$为同一年年均Hi值、年均sc_PDSI值与年均NDVI值的乘积在T年时间序列长度中的最大值;$(x_jy_jz_j)_{\min}$为同一年年均Hi值、年均sc_PDSI值与年NDVI最大值的乘积在T年时间序列长度中的最小值;CH_T^*为第i年的湿润化趋势指数,其取值范围为0~1,数值越大,表明第i年在T年中气候湿润化趋势越明显。

根据气候暖化趋势指数与气候综合湿润化指数,将要素指数年均值或年最大值归一化处理之后,以数值大小确定趋势变化等级,并将等级划分为Ⅰ~Ⅴ级(表1)。为更加详尽了解青海省近60 a气候暖湿趋势变化,对青海省年均暖湿指数等级变化时序采取逐年等级变化分析,以把握全省总体气候暖湿趋势变化;而省内不同区域气候地理条件存在较大差异,会造成不同区域的气候暖湿趋势与程度大不相同,为更加客观真实评价青海省近60 a气候暖湿变化,揭示不同区域的气候空间暖湿变化规律,对全省近60 a不同区域气候暖湿空间等级变化进行评价分析,分析周期为10 a。

表1 气候暖湿化趋势指数评价标准及影响因子

Tab. 1 Evaluation criteria and influencing factors of climate warming and humidification trend index

评价标准						影响因子
指数等级	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	
趋势评价	不显著		微显著	较显著	显著	
暖化趋势指数CW_T	(0,0.2]	(0.2,0.4]	(0.4,0.6]	(0.6,0.8]	(0.8,1]	气温(TEM)
湿润化趋势指数CH_T	(0,0.2]	(0.2,0.4]	(0.4,0.6]	(0.6,0.8]	(0.8,1]	湿润指数(Hi)
						自校核帕尔默干旱指数(sc_PDSI)
综合湿润化趋势指数CH_T^*	(0,0.2]	(0.2,0.4]	(0.4,0.6]	(0.6,0.8]	(0.8,1]	湿润指数(Hi)
						自校核帕尔默干旱指数(sc_PDSI)
						归一化植被指数(NDVI)

2 结果与分析

2.1 青海省气候暖化趋势评价

2.1.1 基于年时间序列变化分析 比较不同时间序列长度下 CW_T 的计算差异，使用青海省近60 a（1960—2020年）与近33 a（1982—2015年）年均气温序列，计算青海省年气候暖化趋势指数 CW_{60} 与 CW_{33}。两指数等级变化趋势（图2）均显示，青海省近60 a气候暖化趋势十分显著，1988年是青海省暖化趋势转变的重要节点，此前指数等级以Ⅱ~Ⅲ级居多、Ⅳ级出现的频率较低；而在1988年暖化等级首次达到Ⅴ级，此后暖化等级呈现波动增加趋势。2000年后等级稳定在Ⅳ级上下，其变化幅度不超过一级，且Ⅴ级出现频率显著增加，青海省近20 a暖化趋势稳定。通过 CW_{60} 与 CW_{33} 在1982—2015年的暖化等级对比（图2），33 a间历年暖化评价等级非常相近，显示时间序列的长短对气候暖化趋势指数 CW_T 的评价影响极小；在1992年出现同年 CW_{60} 等级高于 CW_{33}，这主要是由于近33 a青海省年均气温最小值高于近60 a年均气温最小值，亦是近年青海省暖化趋势显著的体现之一。

2.1.2 基于空间变化分析 1960年暖化等级高值区主要位于青海省西北部柴达木盆地区与东部青海省黄河源区局部地区，暖化等级为Ⅳ~Ⅴ级；低值区主要位于西部可可西里盆地区与东北部祁连山地区，暖化等级Ⅰ~Ⅱ级；剩余地区为中值区，等级为Ⅱ~Ⅲ级；中值区与低值区覆盖了青海省绝大部分地区。1970年暖化等级分布呈现两极分化趋势，高值区中Ⅴ级区域显著扩大，同时中值区及低值区中Ⅰ级区域也显著增加，表现为西北部柴达木盆地区及东南部青海省黄河源区暖化趋势显著，祁连山地区、可可西里盆地区与青海省长江源区部分地区冷化趋势扩大。其后年份中，高值区暖化范围减小、趋势趋于稳定；而低值区则呈现持续暖化趋势。在2020年，除西部可可西里盆地局部地区外，青海省其余地区气候暖化等级均达到Ⅱ级及以上。近60 a，青海省 CW_{60} 在空间分布上较为稳定，其暖化等级的空间分布格局并未发生较大变化（图3）。

2.2 青海省气候湿润化趋势评价

2.2.1 基于气候湿润化趋势指数 CH_T 评价

（1）基于年时间序列变化分析

CH_T 指数变化（图4）显示，青海省在1996年前，

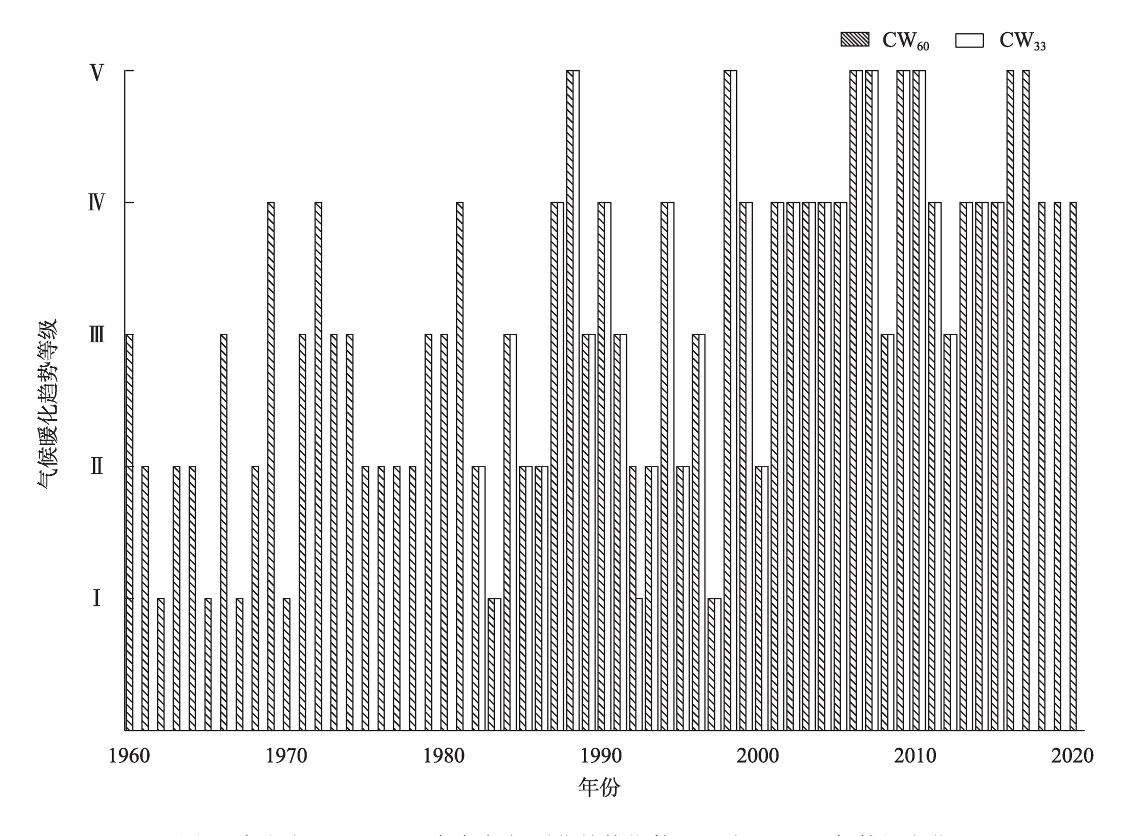


图2 青海省1960—2020年年气候暖化趋势指数 CW_{60} 与 CW_{33} 历年等级变化

Fig. 2 Grade change of CW_{60} and CW_{33} climate warming trend index in Qinghai Province from 1960 to 2020

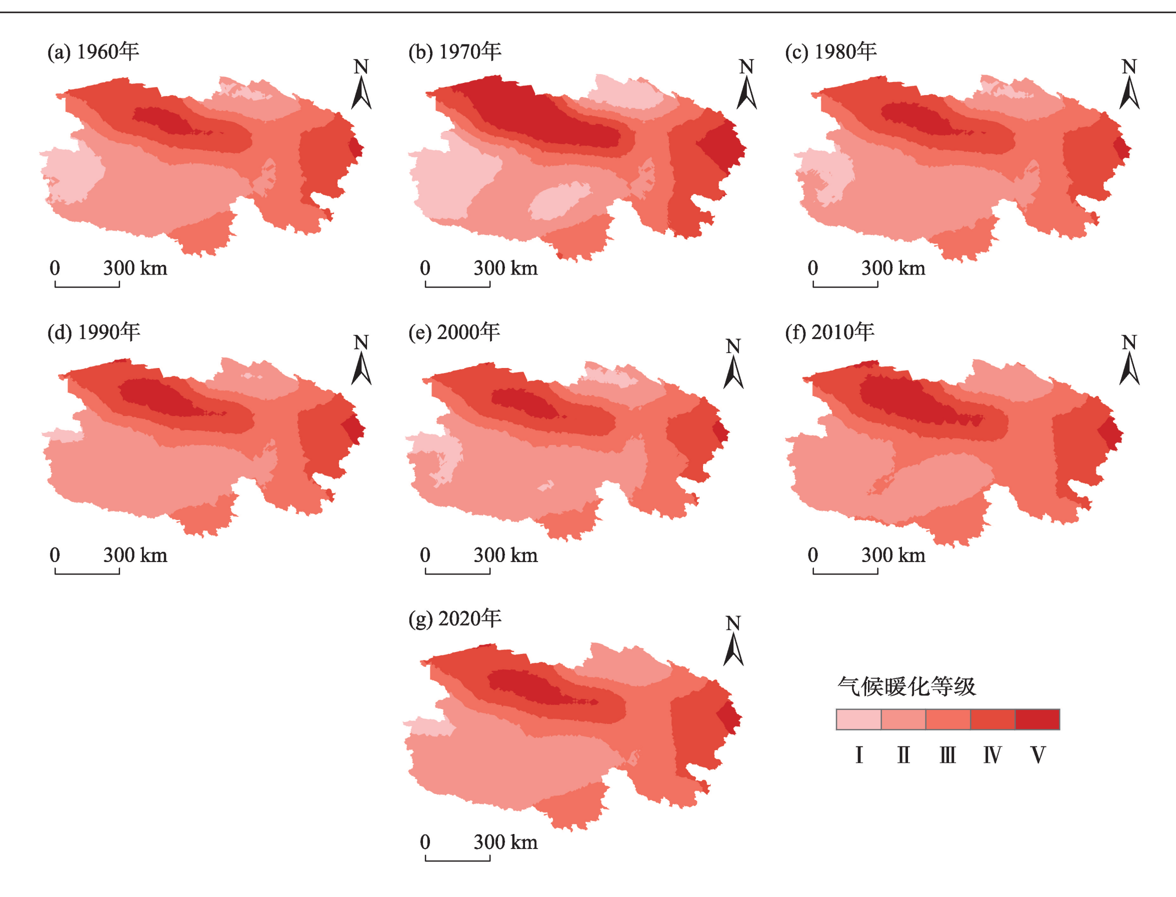


图3 青海省1960—2020年年气候暖化趋势指数CW_{60}空间趋势变化

Fig. 3 Spatial trend change of CW_{60} climate warming trend index in Qinghai Province from 1960 to 2020

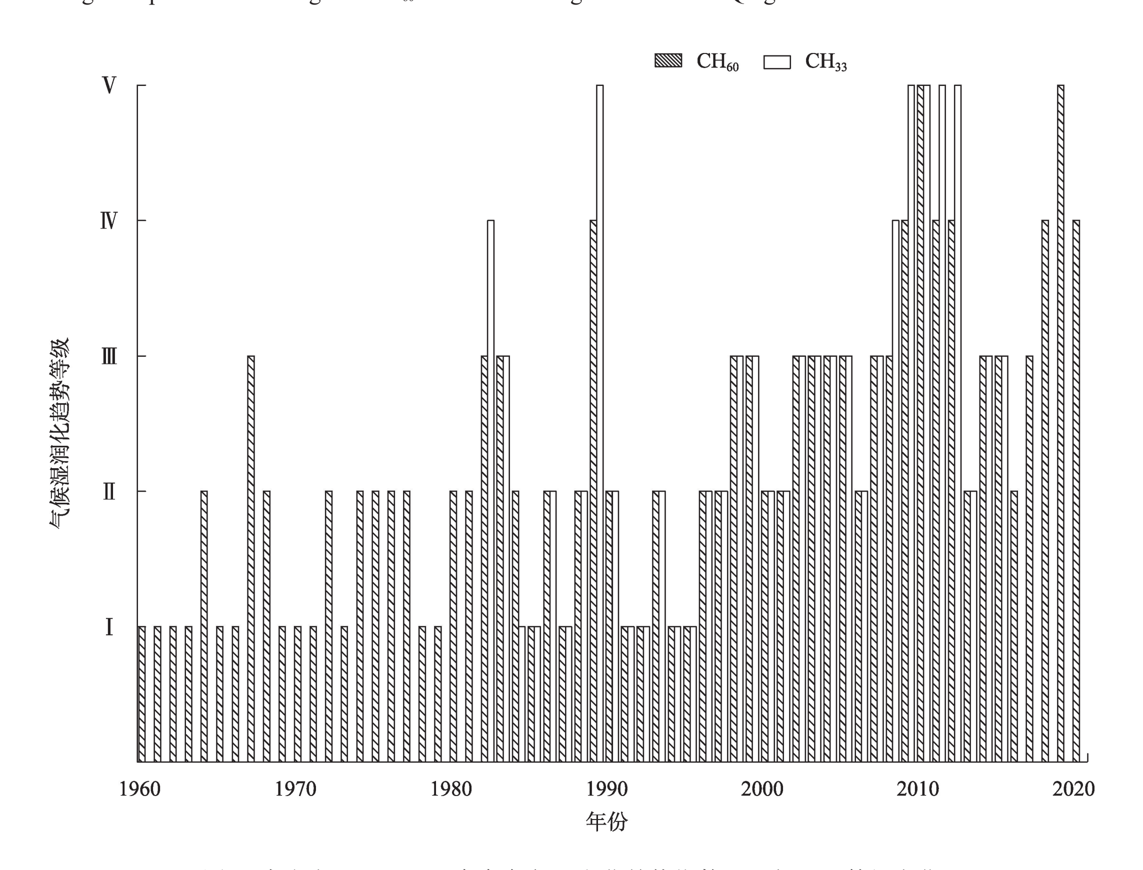


图4 青海省1960—2020年年气候湿润化趋势指数CH_{60}与CH_{33}等级变化

Fig. 4 Grade change of CH_{60} and CH_{33} climate humidification trend index in Qinghai Province from 1960 to 2020

湿润化趋势等级总体维持在Ⅰ~Ⅱ级，Ⅱ级以上等级出现次数极少；1996年后评价等级稳定在Ⅱ级，且Ⅱ级以上年份显著增加；2002年后评价等级呈现波动增加趋势，此时青海省气候已呈现微湿润化趋势，其后年份的湿润等级趋于稳定；2010年湿润化等级首次达到Ⅴ级，其后的2013年与2016年青海省CH_T等级出现大幅减小，其余年份的湿润等级均维持在Ⅲ~Ⅴ级。综合青海省近60 a的CH_T等级变化，青海省气候已呈微湿润化趋势。

CH_{60}与CH_{33}的评价等级在1982—2015年期间，有6 a（1982年、1989年、2008年、2009年、2011年、2012年）同年份CH_{60}评价等级低于CH_{33}，1984年的CH_{60}高于CH_{33}，两指数同年份的等级差维持在一级。造成等级差异的主要原因有：首先CH_{33}评价时间序列较CH_{60}短；其次在1982—2015年期间青海省湿润化趋势较1960—2020年更为显著，但这并不影响CH_T对同一地区不同时间序列长度湿润化趋势的评价结果。由此可见，CH_T对气候湿润化趋势的评价结果受时间序列长度的影响极小。

（2）基于空间趋势变化分析

1960年青海全省湿润化等级极低，等级介于Ⅰ~Ⅱ级，东南部黄河流域源区局部地区与西南部青海省长江源区小部分地区湿润等级为Ⅰ级，其余地区均为Ⅱ级；直至20世纪80年代，青海省气候湿润化等级与空间分布并无显著变化，20 a间澜沧江流域地区较全省其余地区气候湿润等级较高；80年代湿润化等级显著上升，西北部可可西里盆地及柴达木盆地区、青海省黄河源区及澜沧江源区湿润等级明显提升，等级达到Ⅲ级；90年代湿润等级分布与60年代相似，澜沧江源区较青海省其他地区湿润等级更高；2000年后，青海省湿润等级出现大范围提升，北部柴达木盆地区至东北部祁连山地区的湿润等级提升至Ⅲ级，其后年份湿润等级增加趋势向南部地区扩散，三江源地区湿润等级大范围提升；2012年南部地区与东北部祁连山部分地区湿润等级处于Ⅲ级，其余地区处于Ⅱ级；湿润等级的大范围增加趋势并没有持续，2015年除东部祁连山部分地区湿润等级维持在Ⅲ级外，其余地区湿润等级均降至Ⅱ级，2020年湿润等级由中部地区向东南方向三江源地区逐级递增，等级范围在Ⅲ~Ⅴ级，除东北部祁连山地区外，其余大部分地区等级均为Ⅱ级。

近60 a青海省CH_{60}指数等级空间变化幅度波动较小，等级范围主要集中在Ⅰ~Ⅲ级，呈周期性变化；2015年后东南部三江源地区CH_{60}等级大幅提升，东南地区气候湿润化趋势明显。近60 a湿润指数CH_{60}空间格局分布变化缺乏明显规律性（图5）。

2.2.2 基于气候综合湿润化趋势指数CH_T^*评价

（1）基于年时间序列变化分析

气候综合湿润指数CH_{33}^*历年等级变化（图6）显示，青海省在1996年前指数等级变化趋势不稳定，指数等级维持在Ⅰ~Ⅱ级；1996年后指数等级稳定于Ⅱ级，并呈现缓慢增加趋势，Ⅲ级以上年份显著增加，2003年后湿润等级大幅提升，2010年湿润化等级达到Ⅴ级，2012年后湿润趋势回落，等级维持在Ⅱ~Ⅲ级。CH_{33}^*指示青海省气候于1982—2015年间已进入微湿润化阶段。

（2）基于空间趋势变化分析

青海省1982年湿润化等级处于Ⅲ~Ⅳ级，南部三江源部分地区、东北部祁连山部分地区湿润化等级达到Ⅳ级，其余地区均为Ⅲ级。至20世纪90年代初，湿润等级无明显变化；90年代青海省湿润化等级出现大范围降低，其中青海黄河源区湿润化等级变化介于Ⅰ~Ⅲ级，澜沧江源区湿润化等级维持在Ⅲ级，此区域湿润等级有明显向西北方向逐渐扩大，其余地区湿润化等级维持在Ⅲ级。2000年后，青海黄河源区湿润等级出现小范围增长，等级在Ⅱ~Ⅲ间波动；而祁连山地区湿润等级呈显著增长趋势，湿润等级达到Ⅳ级，且范围向西扩大；中部地区与三江源区西南部地区湿润化等级达到Ⅳ级，小部分地区达到Ⅴ级。2012年湿润等级介于Ⅲ~Ⅴ级，南北部地区分级明显，南部地区湿润等级高于北部地区，澜沧江源区湿润等级达到Ⅴ级。2015年全省除东北部祁连山部分地区湿润等级达到Ⅳ级外，其余地区湿润等级均维持在Ⅲ级（图7）。

2.2.3 CH_T与CH_T^*评价结果对比

（1）年时间序列变化对比分析

对比青海省湿润等级指数CH_{33}与CH_{33}^*在1982—2015年历年湿润等级（图8），相同时间序列长度下，大部分年份湿润等级一致；在1982年、1998年、2008年、2009年出现CH_{33}湿润等级高于CH_{33}^*，反映出植被变化对气候湿润化的滞后响应。两指数都显示，在1995年青海省湿润化趋势开始稳定在Ⅱ级，并在2008年具有微湿润化趋势且趋于稳定；其后在2013年和2016年湿润等级大幅减小，主要

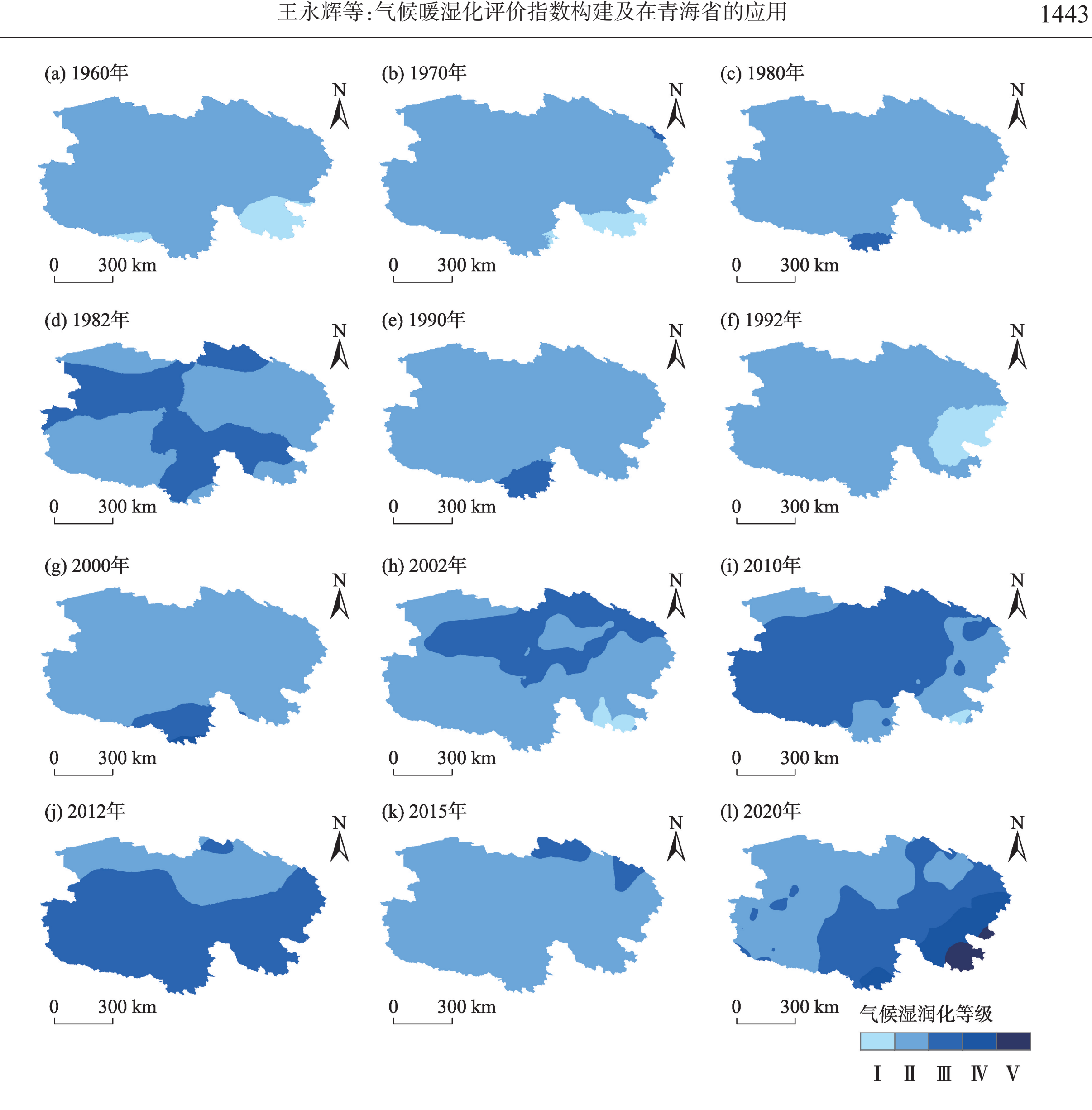


图5 青海省1960—2020年年气候湿润化趋势指数CH_{60}空间趋势变化

Fig. 5 Spatial trend change of CH_{60} climate humidification trend index in Qinghai Province from 1960 to 2020

原因为这2 a青海省年均sc_PDSI数值的大幅减小；但在2017年后湿润化等级迅速回升，直至2020年总体湿润化趋势恢复波动增加。CH_T^*也指示出青海省近39 a有微湿润化趋势。

（2）基于空间趋势变化分析

对比青海省湿润指数CH_{33}与CH_{33}^*近33 a（1982—2015年）的湿润等级空间变化（图5、图7），二者均显示，2000—2015年祁连山地区与三江源区部分地区气候湿润程度显著增加，湿润化等级由西北向东南方向呈逐级递增趋势。CH_{33}^*较CH_{33}气候湿润等级在空间范围上普遍有1~2级的提升，但二者所呈现的青海省湿润等级分布格局及历年变化趋势十分相近，在青海省气候湿润趋势评价中体现了较好的一致性。

3 讨论

3.1 青海省近60 a气候暖湿化趋势评价

青海省近60 a年均CW_{60}等级变化显示，全省自1988年后出现持续暖化态势，尤以2000—2020年暖化程度显著。而省内年均CW_{60}等级的空间变化则呈现不同的暖化趋势，60 a间青海省柴达木盆地区与青海省黄河源区东部气候暖化趋势持续显著，青海省澜沧江源区气候暖化持续微显著趋势，青海省长江源区与西部可可西里盆地区暖化趋势并不显著。60 a中青海省气候暖化趋势在空间增长幅度上

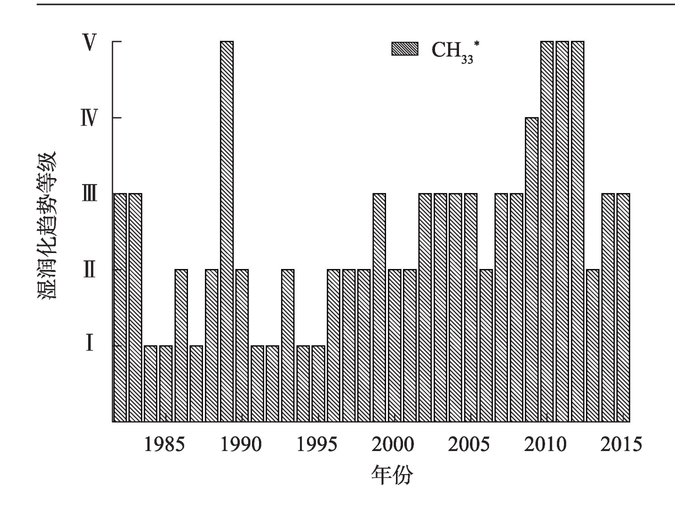


图6 青海省1982—2015年年气候湿润化趋势指数CH_{33}^*历年等级变化

Fig. 6 Grade change of CH_{33}^* climate humidification trend index in Qinghai Province from 1981 to 2019

较为稳定，暖化趋势向东部祁连山地区与西南部长江源区缓慢传递，全省各区域气候暖化等级的空间分布格局并未发生较大变化。

青海省近60 a年均CH_{60}与33 a CH_{33}^*等级变化显示，全省在1996年前气候并不具备湿润化趋势，这与李林等[9]指出的青藏高原降雨量突变年份相符。1996年后湿润化趋势显现，2002年后全省气候湿润化等级呈现波动性增加，此时青海省气候较60 a总体变化呈现出微湿润化趋势，其后年份湿润等级趋于稳定；至2020年青海省气候湿润化趋势维持在微湿润化状态。而省内两湿润指数等级的空间变化则呈现不同区域的气候湿润化程度及湿润化趋势变化幅度不同：近60 a青海省气候湿润化趋势空间变化幅度波动性较大，气候湿润化趋势呈现周期性变化。20世纪80—90年代初，青海省湿润化趋势初现，在祁连山地区及青海黄河源区、澜沧江流域部分地区，西北部柴达木盆地区至中部地区也呈现出短暂湿润趋势；90年代后青海省气候湿润化趋势减弱；2000—2015年湿润化趋势再度增强，这一时期的湿润化趋势更加明显，覆盖区域面积显著增加，这一时期不同区域湿润程度均有增加，以南部三江源地区与东部祁连山地区湿润程度变化最为显著；2015年后湿润化趋势再度减弱，较湿润区域缩减至东南部三江源流域部分地区至北部祁连山部分地区，而黄河流域东南部地区的湿润程度则显

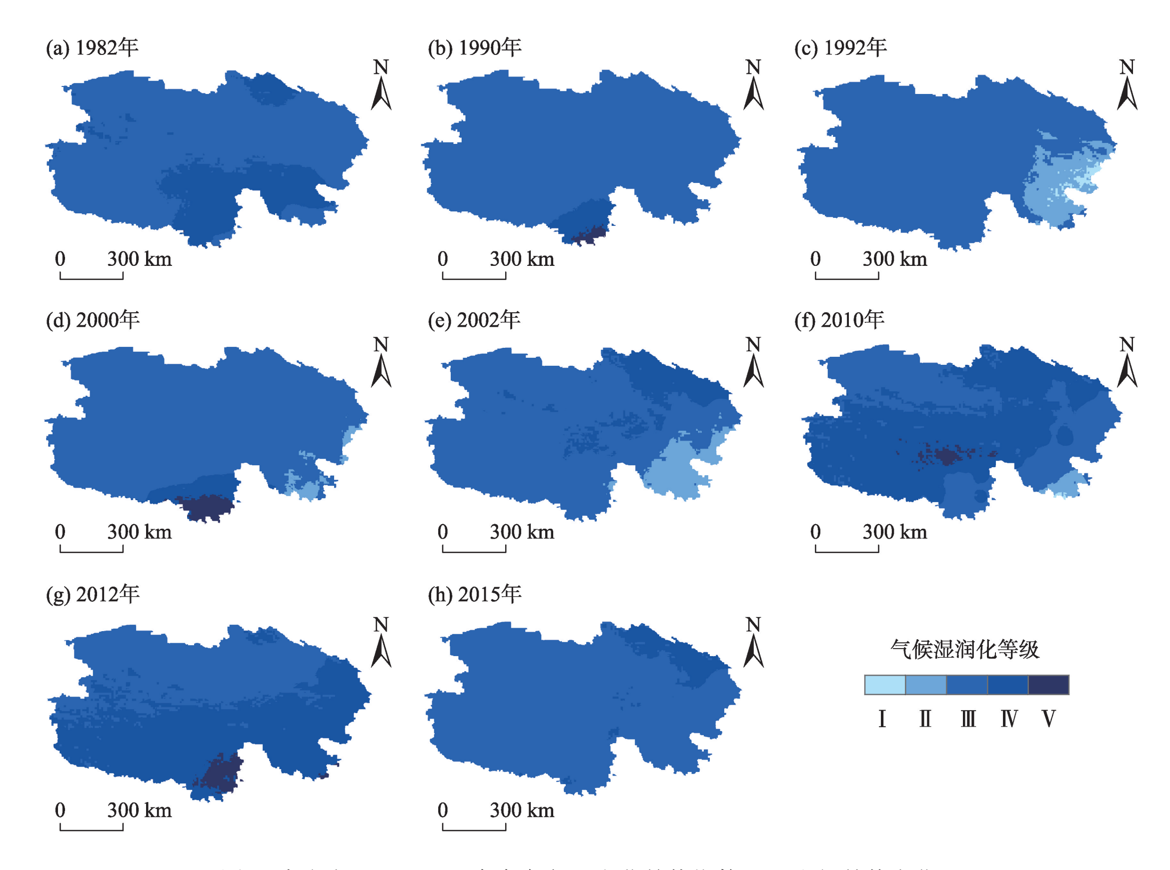


图7 青海省1982—2015年年气候湿润化趋势指数CH_{33}^*空间趋势变化

Fig. 7 Spatial trend change of CH_{33}^* climate humidification trend indexin Qinghai Province from 1960 to 2020

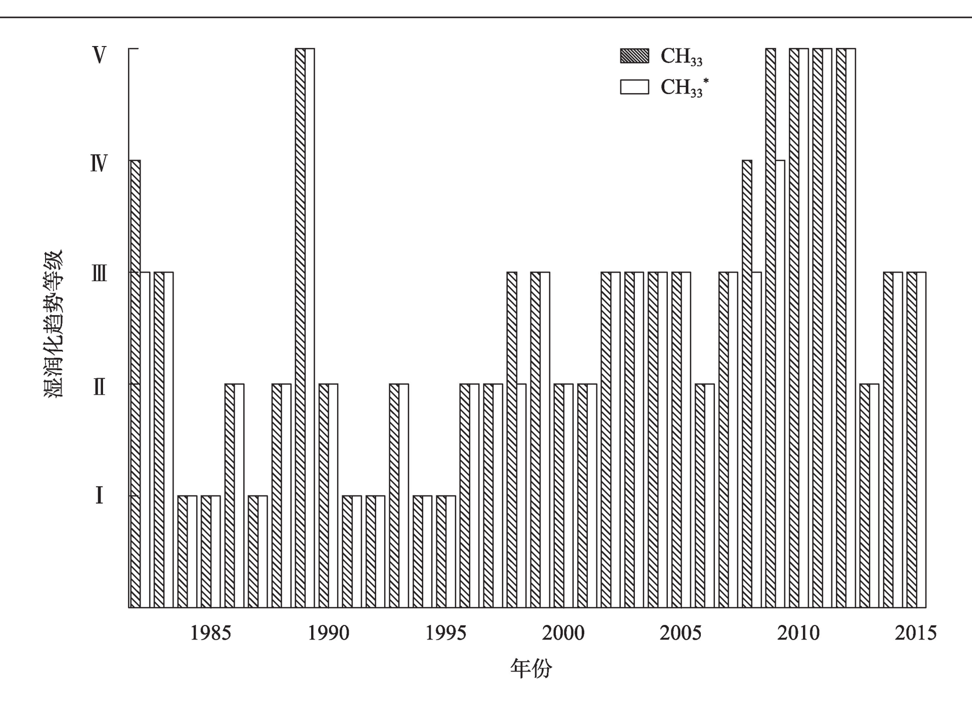


图8 青海省1982—2015年年气候湿润化趋势指数CH_{33}与CH_{33}^*等级变化对比

Fig. 8 Grade change comparison of CH_{33} and CH_{33}^* climate humidification trend index in Qinghai Province from 1981 to 2019

著提升。青海省近60 a的气候湿润化趋势总体呈现出不显著—微显著—不显著—微显著变化,而区域湿润化的空间分布格局变化并不具明显规律性。

全省气候暖化程度高值区集中在柴达木盆地区与青海黄河源区东部地区,前者是由于柴达木盆地独特的地理构造所造成的干旱气候导致气温长年高于其他地区,后者则是因为该区域城市化建设,人口急剧增加所造成的。CW_T指数变化主要取决于年均气温,伊俊兰等[26]也指出,青海省东部农业区及柴达木盆地的年均气温较高,祁连山区及青南一线地区平均气温较低,这与本文结论相符。而气候湿润化程度则并不存在显著的高值区域,相较全省其他地区,祁连山部分地区、青海澜沧江源区与青海黄河源区东南部气候湿润化趋势更加显著,这与该区域植被覆盖度较高并且水资源(冰川、雪山、湿地等)丰富有较大关系。但根据张强等[27]对西北地区未来气候变湿趋势的预测分析,西北地区未来30 a湿润化趋势将会减缓甚至消失,这与本文提出青海省的年际气候湿润化趋势变化规律相符,这对未来青海省三江源地区的水资源规划利用是一个巨大挑战。

综合对比发现,全省气候暖湿化地区都具有区域生境受人为干扰少、植被覆盖率高、水资源充足等特点。其中,青海澜沧江源区及青海黄河源区气候的显著暖湿化极有可能是因为气候暖化造成三江源地区的雪山融化与冰川缩减,该区域水资源总量增多,从而加速了区域水汽循环,导致降雨量增多,使得湿润程度加剧,植被覆盖增加;人为因素对该区域气候湿润化趋势也有一定影响:青海省自2000年开始实施退耕还林还草工程[28],其后在2005年实施《青海三江源自然保护区生态保护和建设总体规划》,均起到了不容忽视的作用[29]。刘彩红等[30]在基于黄河源区近60 a均一化气温与降水数据分析中也同样指出,近10 a黄河源区气候暖湿化趋势尤为显著,年降雨量是影响年径流量的主要气候因子[31]。气候暖湿化趋势显著对三江源区的生境多样性保护,青海省及下游省份的发展都具有重大意义,但如何利用这一趋势合理规划发展战略也成为了新的挑战。另外,柴达木盆地区气候暖干化趋势加剧,依旧不利于青海省新时期的生态发展。

青海省近60 a气候暖湿化趋势指数时空变化显示,近60 a气候变化并没有改变青海省的气候暖湿分布格局。Zhang等[32-33]在基于西北地区暖湿化对生态植被的影响与西北地区增湿东扩趋势,对环流机制的协同效应中均提出目前的西北暖湿化趋势并未改变西北地区基本的气候格局;姚俊强等[34]分析新疆气候暖湿化特征中提出新疆地区的增湿趋势并没有改变当地的干旱气候环境。许多研究都

表明，目前的气候暖湿趋势未改变西北地区已有的气候格局，但未来这一趋势的发展依旧有许多不确定性。

3.2 气候暖湿指数适用性分析

气候暖湿趋势评价指数在不同时间序列长度下评价结果差异性极小，并不会影响气候暖湿化整体趋势评价结果。在相同时空尺度下，涵盖不同因素的气候湿润指数 CH_r^* 所评价的湿润等级更高，且更敏感。而该类指数局限性在于：首先指数计算中并没有考虑影响要素的权重，对不同的评价区域，选取不同的影响要素并赋予不同的权重，能使评价结果更具合理性；在空间变化分析中，对全省暖湿指数影响因素分布采用了插值方法，淡化了暖湿化这一特殊气候的局部影响，对不同区域评价使用相应气象站点的气象数据能够提升评价结果的准确性。青海省乃至西北地区的气候暖湿趋势是气象、生态以及人为活动耦合造成的复杂变化，在未来评价过程中，可考虑更多影响要素，建立更具综合性的气候暖湿评价方法。

4 结 论

（1）青海省近60 a气候总体变化趋势正处于显著暖化又微湿润化趋势，其中东南部祁连山部分地区、黄河源区南部至东南部与澜沧江源区气候暖湿化趋势最为显著；但近60 a的评价结果显示，青海省的基本气候暖湿分布格局并未改变。

（2）基于数据归一化处理的气候暖湿化评价指数，在对青海省近60 a的气候暖湿变化评价中体现了其适用性与实用性，不仅适用于资料序列短缺、指标因素资料较少的地区进行暖湿化趋势评价，还可对每年区域暖湿化程度进行快速评价。相较已有方法，即便资料序列精确度不高，该类指数依旧能根据指标因素整体变化趋势判断该地区的暖湿趋势。

参考文献(References)：

[1] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219–226. [Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic Shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China[J]. Journal of Glaciolgy and Geocryology, 2002, 24(3): 219–226.]

[2] 张存杰, 李栋梁, 王小平. 东北亚近100年降水变化及未来10~15年预测研究[J]. 高原气象, 2004, 23(6): 919–929. [Zhang Cunjie, Li Dongliang, Wang Xiaoping. Study on precipitation variability in last 100 years and trend prediction in Northeast Asia in future 10–15 years[J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(6): 919–929.]

[3] 张强, 张存杰, 白虎志, 等. 西北地区气候变化新动态及对干旱环境的影响——总体暖干化, 局部出现暖湿迹象[J]. 干旱气象, 2010, 28(1): 1–7. [Zhang Qiang, Zhang Cunjie, Bai Huzhi, et al. New development of climate change in Northwest China and its impact on arid environment[J]. Journal of Arid Meteorology, 2010, 28(1): 1–7.]

[4] 陈冬冬, 戴永久. 近五十年我国西北地区降水强度变化特征[J]. 大气科学, 2009, 33(5): 923–935. [Chen Dongdong, Dai Yongjiu. Characteristics of Northwest China rainfall intensity in recent 50 years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2009, 33(5): 923–935.]

[5] 牛涛, 刘洪利, 宋燕, 等. 青藏高原气候由暖干到暖湿时期的年代际变化特征研究[J]. 应用气象学报, 2005, 16(6): 763–771. [Niu Tao, Liu Hongli, Song Yan, et al. Study on decade change of climate shift from warm-dry period to warm-wet period over Tibetan plateau[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2005, 16 (6): 763–771.]

[6] 李林, 李凤霞, 朱西德, 等. 三江源地区极端气候事件演变事实及其成因探究[J]. 自然资源学报, 2007, 22(4): 656–663. [Li Lin, Li Fengxia, Zhu Xide, et al. Study on the evolution law of the extreme climatic events over the source region of the Three Rivers [J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(4): 656–663.]

[7] 李林, 朱西德, 王振宇, 等. 青藏高原气候变化趋于暖湿化的若干事实[C]//中国气象学会. 第26届中国气象学会年会气候变化分会场论文集. 杭州: 中国气象学会, 2009: 944–950. [Li Lin, Zhu Xide, Wang Zhengyu, et al. Some facts of warming and humidifying climate change in Qinghai-Tibet Plateau[C]//China Meteorological Society. Papers on Climate Change Branch of the 26th Annual Conference of China Meteorological Society. Hangzhou: China Meteorological Society, 2009: 944–950.]

[8] 李林, 陈晓光, 王振宇, 等. 青藏高原区域气候变化及其差异性研究[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(3): 181–186. [Li Lin, Chen Xiaoguang, Wang Zhengyu, et al. Climate change and its regional differences over the Tibetan Plateau[J]. Advances in Climate Change Research, 2010, 6(3): 181–186.]

[9] 李林, 李红梅, 申红艳, 等. 青藏高原气候变化的若干事实及其年际振荡的成因探讨[J]. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1079–1089. [Li Lin, Li Hongmei, Shen Hongyan, et al. The truth and interannual oscillation causes for climate change in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(6): 1079–1089.]

[10] 刘德坤, 王军邦, 齐述华. 基于湿润指数的近35年青海省干湿状况变化分析[J]. 水土保持研究, 2014, 21(2): 246–250, 256, 335. [Liu Dekun, Wang Junbang, Qi Shuhua, et al. Analysis on

dry trend based on moisture index in Qinghai Province in the recent 35 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(2): 246−250, 256, 335.]

[11] Liu Zhiyong, Zhou Ping, Zhang Fangqiu, et al. Spatiotemporal characteristics of dryness/wetness conditions across Qinghai Province, Northwest China[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 182−183: 101−108.

[12] 伍云华. 青海省水资源现状评价及对策建议[J]. 水利规划与设计, 2017(9): 35−36, 54. [Wu Yunhua. Water resources status evaluation and countermeasures in Qinghai Province[J]. Water Resources Planning and Design, 2017(9): 35−36, 54.]

[13] Harris I, Osborn T J, Jones P, et al. Version 4 of the CRU TS monthly high- resolution gridded multivariate climate dataset[J]. Scientific Data, 2020, 7(1). https: //doi. org/10. 6084/m9. figshare. 11980500.

[14] 卫林勇, 江善虎, 任立良, 等. CRU产品在中国大陆的干旱事件时间性效用评估[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 112−120. [Wei Linyong, Jiang Shanhu, Ren Liliang, et al. Utility assessment of CRU products for temporality of drought events in China's mainland[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 112−120.]

[15] 张寅, 闫凯, 刘钊, 等. 基于CRU数据的1901—2018年全球陆表气温时空变化特征分析[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2020, 41(6): 51−58. [Zhang Yin, Yan Kai, Liu Zhao, et al. Analysis of spatio-temporal variation characteristics of global surface air temperature from 1901 to 2018 based on CRU data[J]. Journal of Capital Normal University(Natural Science Edition) , 2020, 41(6): 51−58.]

[16] 王丹, 王爱慧. 1901—2013年GPCC和CRU降水资料在中国大陆的适用性评估[J]. 气候与环境研究, 2017, 22(4): 446−462. [Wang Dan, Wang Aihui. Applicability assessment of GPCC and CRU precipitation products in China during 1901 to 2013[J]. Climatic and Environmental Research, 2017, 22(4): 446−462.]

[17] 阴晓伟, 吴一平, 赵文智, 等. 西北旱区潜在蒸散发的气候敏感性及其干旱特征研究[J]. 水文地质工程地质, 2021, 48(3): 20−30. [Yin Xiaowei, Wu Yiping, Zhao Wenzhi, et al. Drought characteristics and sensitivity of potential evapotranspiration to climatic factors in the arid and semi-arid areas of Northwest China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2021, 48(3): 20−30.]

[18] Ekstrom M, Jones P D, Fowler H J, et al. Regional climate model data used within the SWURVE project 1: projected changes in seasonal patterns and estimation of PET[J]. Hydrology and Earth System sciences, 2007, 11(3): 1069−1083.

[19] 黄小燕, 张明军, 贾文雄, 等. 中国西北地区地表干湿变化及影响因素[J]. 水科学进展, 2011, 22(2): 151−159. [Huang Xiaoyan, Zhang Mingjun, Jia Wenxiong, et al. Variations of surface humidity and its influential factors in Northwest China[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(2): 151−159.]

[20] 杜军, 周刊社, 袁雷. 1971—2018年西藏羌塘国家级自然保护区地表湿润指数的变化趋势[J]. 中国水土保持科学, 2021, 19(4): 13−23. [Du Jun, Zhou Kanshe, Yuan Lei. Climate change tendency of surface humidity index in Chang Tang Nature Reserve of Tibet from 1971 to 2018[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021, 19(4): 13−23.]

[21] 蔡鸿昆, 雷添杰, 程慧, 等. 旱情监测指标体系研究进展及展望[J]. 水利水电技术, 2020, 51(1): 77−87. [Cai Hongkun, Lei Tianjie, Cheng Hui, et al. Advances in drought monitoring index system [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(1): 77−87.]

[22] Mika J, Horváth S, Makra L, et al. The Palmer Drought Severity Index (PDSI) as an indicator of soil moisture[J]. Physics and Chemistry of The Earth, Parts A/B/−C, 2005, 30(1−3): 223−230.

[23] 胡光成, 周杰, 卢静, 等. 中国西南地区历年月度干旱指数(1951−2016)和8天频率土壤湿度(2007−2016)数据集[J]. 全球变化数据学报, 2020, 4(3): 248−256. [Hu Guangcheng, Zhou Jie, Lu Jing, et al. Monthly drought index(1951−2016) and 8-day frequency soil moisture(2007−2016) dataset in Southwest China[J]. Journal of Global Change Data & Discovery, 2020, 4(3): 248−256.]

[24] 张乐艺, 李霞, 冯京辉, 等. 2000—2018年黄河流域NDVI时空变化及其对气候和人类活动的双重响应[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 276−286. [Zhang Leyi, Li Xia, Feng Jinhui, et al. Spatial-temporal changes of NDVI in Yellow River basin and its dual response to climate change and human activities during 2000−2018[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 276−286.]

[25] 叶培龙, 张强, 王莺, 等. 1980—2018年黄河上游气候变化及其对生态植被和径流量的影响[J]. 大气科学学报, 2020, 43(6): 967−979. [Ye Peilong, Zhang Qiang, Wang Ying, et al. Climate change in the upper Yellow River Basin and its impact on ecological vegetation and runoff from 1980 to 2018[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(6): 967−979.]

[26] 伊俊兰, 祁栋林, 许雪莲, 等. 1961—2019年青海省气候生产潜力时空演变特征[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(20): 234−242. [Yi Junlan, Qi Donglin, Xu Xuelian, et al. Temporal and spatial evolution characteristics of climate productivity potential in Qinghai Province from 1961 to 2019[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(20): 234−242.]

[27] 张强, 朱飙, 杨金虎, 等. 西北地区气候湿化趋势的新特征[J]. 科学通报, 2021, 66(Z2): 3757−3771. [Zhang Qiang, Zhu Biao, Yang Jinhu, et al. New characteristics about the climate humidification trend in Northwest China[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66 (Z2): 3757−3771.]

[28] 韩辉邦, 马明国, 马守存, 等. 近30 a青海省植被变化及其气候驱动因子分析[J]. 干旱区研究, 2017, 34(5): 1164−1174. [Han Huibang, Ma Mingguo, Ma Shoucun, et al. Vegetation change and its driving climatic factors in Qinghai Province in recent 30 years [J]. Arid Zone Research, 2017, 34(5): 1164−1174.]

[29] 刘小园, 刘希胜. 青海省湿地面积变化特征及成因分析[J]. 人民

黄河, 2021, 43(8): 90−95, 101. [Liu Xiaoyuan, Liu Xisheng. Variation characteristics and cause analysis of wetland area in Qinghai province[J]. Yellow River, 2021, 43(8): 90−95, 101.]

[30] 刘彩红, 王朋岭, 温婷婷, 等. 1960—2019年黄河源区气候变化时空规律研究[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 293−302. [Liu Caihong, Wang Pengling, Wen Tingting, et al. Spatio-temporal characteristics of climate change in the Yellow River source area from 1960 to 2019[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 293−302.]

[31] 保广裕, 乜虹, 戴升, 等. 黄河上游河源区不同量级降水对径流变化的影响[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 704−713. [Bao Guangyu, Nie Hong, Dai Sheng, et al. Research on effects of different precipitation magnitudes on runoff changes in the headwater region of the upper Yellow River[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 704−713.]

[32] Zhang Qiang, Yang Jinhu, Wang Wei, et al. Climatic warming and humidification in the arid region of Northwest China: Multi-scale characteristics and impacts on ecologyical vegetation[J]. Journal of Meteorological Research, 2021, 35(1): 113−127.

[33] Zhang Qiang, Yang Jinhu, Duan Xinyu, et al. The eastward expansion of the climate humidification trend in Northwest China and the synergistic influences on the circulation mechanism[J]. Climate Dynamics, 2022, https: //doi. org/10. 1007/s00382−022−06221−4.

[34] 姚俊强, 李漠岩, 迪丽努尔·托列吾别克, 等. 不同时间尺度下新疆气候"暖湿化"特征[J]. 干旱区研究, 2022, 39(2): 333−346. [Yao Junqiang, Li Moyan, Dilinuer Tuoliewubieke, et al. The assessment on "warming-wetting" trend in Xinjiang at multi-scale during 1961−2019[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(2): 333−346.]

Construction of climate warming and humidification evaluation index and its application in Qinghai Province

WANG Yonghui[1,2], YE Xiaojuan[1,2], PAN Hongzhong[1,2], BAI Yu[3], DONG Defu[3], YAO Huaming[1,2,4]

(1. Hubei Key Laboratory of Petroleum Geochemistry and Environment, Yangtze University, Wuhan 430000, Hubei, China; 2. Resource And Environmental Engineering College of Yangtze University, Wuhan 430000, Hubei, China; 3. Huanghe Hy-Dropower Devel Opement Co. Ltd, Xining 810000, Qinghai, China; 4. China Yangtze Power Co. Ltd, Yichang 443000, Hubei, China)

Abstract: Different methods have different research results on the duration and variation of this phenomenon, causing dissidence. In this paper, the evaluation index of climate warming and humidification was constructed by combining meteorological factors and drought and vegetation indexes. The surface moisture index (Hi), self-checking Palmer drought index (sc_PDSI), and annual NDVI were used to construct the evaluation index of the warming and humidification grade based on the method of data normalization. This kind of index was used to comprehensively evaluate the spatial and temporal distribution of climate warming and humidity in Qinghai Province over the past 60 years to verify the applicability of the index in different time series lengths and cover different factors. The evaluation results show the following: (1) the overall climate of Qinghai Province over the past 60 years is in the stage of obvious indigenous warming and micro-humidifying. The affected regions are concentrated in parts of the Qilian Mountains in the southeast, southern to the southeast of the Yellow River Basin and Lancang River Basin. (2) Climate change has not changed the distribution pattern of climate warming and water resources in Qinghai Province over the past 60 years. (3) This kind of index has positive applicability for regional long-time scale warming and humidifying evaluation and can objectively and timely reflect the warming and humidifying situation of the evaluation area.

Keywords: Qinghai Province; climate warming and humidification trend; index evaluation